ГЛАВА II

УДК 631.331

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОСЕВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Куцеев Владимир Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Тракторы, автомобили и техническая механика»

Дмитриев Дмитрий Александрович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Аннотация: В главе представлены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы первого этапа разработки мультиагентной роботизированной системы посева сельскохозяйственных культур. Исследования выполнены в почвенно-климатических условиях Краснодарского края.

Ключевые слова: роботизация, посев, бионика, классификация, мультиагентная роботизированная система, подсистема, мобильный робот, мотор-колесо, ампула-гидроаккумулятор.

DEVELOPMENT OF A MULTI-AGENT ROBOTIC SOWING SYSTEM FOR AGRICULTURAL CROPS

Kutseev Vladimir Vasilyevich

Dmitriev Dmitry Aleksandrovich

Abstract: The chapter presents the results of research and development work of the first stage of the development of a multi-agent robotic sowing system for agricultural crops. The studies were carried out in the soil and climatic conditions of the Krasnodar Territory.

Key words: robotization, seeding, bionics, classification, multi-agent robotic system, subsystem, mobile robot, motor-wheel, ampoule-hydroaccumulator.

1.1 Актуальность. Машинные технологии сельскохозяйственного производства обеспечивают продовольственную и технологическую безопасность государства. В настоящее время в аграрном секторе Российской Федерации эксплуатируют зарубежную сельскохозяйственную технику, а также отечественную сельскохозяйственную технику, скопированную все с той же зарубежной техники. Как следствие, отечественная сельскохозяйственная техника не конкурентоспособна на зарубежных рынках. Текущий момент характерен тем, что зарубежные производители сельскохозяйственной техники занимаются созданием робототехники. Из этого следует, что отечественные разработчики, занимающиеся механизацией технологических процессов, разрабатывают заведомо морально устаревшую технику. Исчезает перспектива продаж в будущем отечественной сельскохозяйственной техники на зарубежных рынках.

Следовательно, актуально создание нового конкурентоспособного на зарубежных рынках поколения отечественных сельскохозяйственных машин в тенденции роботизации, заданной зарубежными производителями-конкурентами. Разрабатываемая мультиагентная роботизированная система посева сельскохозяйственных культур – это попытка создания отечественной сельскохозяйственной техники, относящейся к новому поколению сельскохозяйственных машин – роботизированному.

Известно, что несоблюдение агротехнических требований приводит к снижению урожая зерна и листостебельной массы сельскохозяйственных культур [1, с. 27]. В связи с этим целесообразно за счет увеличения производительности посевных технических средств, во-первых, увеличить засеваемую в агротехнический срок площадь полей, во-вторых, при тех же засеваемых площадях сократить сроки посева. Для этого разрабатываем следующие идеи усовершенствования посева. Это увеличение количества рабочих смен при посеве, то есть организация работы круглосуточно, а также сокращение простоев техники. При исключении визуального контроля за технологическим процессом, появляется возможность работать в ночное время без освещения. Если есть необходимость, то одной роботизированной системой посева одновременно засевают несколько смежных полей. Причем, если также есть необходимость, то засевают эти смежные поля разными сельскохозяйственными культурами.

1.2 Общие вопросы. У разрабатываемой мультиагентной роботизированной системы посева сельскохозяйственных культур в бионическом аспекте есть природный аналог – пчелиный рой. В современной

теории искусственного интеллекта роевой интеллект (РИ) (англ. Swarm intelligence) описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Роботизированные системы, имеющие роевой (эмерджентный) интеллект состоят из множества агентов (боидов) локально взаимодействующих между собой и с внешней средой. Каждый боид функционирует по простым правилам и, несмотря на то, что нет какой-либо централизованной системы управления поведением боидов, локальные и, в некоторой степени, случайные взаимодействия приводят к возникновению интеллектуального группового поведения, неконтролируемого отдельными боидами. В целом, РИ разрабатывают как мультиагентную систему (МАС, англ. Multi-agent system) которая должна обладать самоорганизующимся поведением, причем в определенной степени разумным [2].

Достижения в робототехнике и мехатронике позволяют создавать малогабаритные мобильные роботы с достаточно мощным бортовым вычислительным ресурсом. В разрабатываемой мультиагентной роботизированной системе посева сельскохозяйственных культур технологические операции выполняет группа мобильных роботов (агентов или боидов),двигающихся в поле по заранее намеченной траектории с заданной постоянной скоростью. Она включает следующие подсистемы: основную подсистему посева и вспомогательные подсистемы внесения в ценоз рабочих растворов, порошкообразных и гранулированных удобрений, а также живого сыпучего материала, обеспечивающего биологическую защиту возделываемых растений. Кроме того, имеются транспортная подсистема и энергетическая подсистема, в которой энергия из возобновляемых источников (солнечная) преобразуется в электрическую энергию.

На данном первом этапе разрабатываем два варианта управления мобильными роботами. Это дистанционное управление и автономный режим функционирования мобильных роботов.

В аспекте опытно-конструкторских работ на стадии эскизного проекта разработаны три варианта конструкции мобильного робота роботизированной системы посева сельскохозяйственных культур. Принципиальное отличие первых двух вариантов конструкции мобильного робота в том, что они обеспечивают заделку семян в почву на заданную глубину. В первом из рассматриваемых вариантов разрабатываемой конструкции мобильного

робота в качестве комплектующего изделия используем квадрокоптер (рис. 1) [3].

1 – прикатывающий каток; 2 – беспилотный летательный аппарат;
3 – колесо; 4 – сошник

**Рис. 1. Схема мобильного робота роботизированной системы посева,
вид под углом 45°**

Это обеспечивает перемещение мобильного робота во время посева по поверхности поля и его полет к месту хранения после окончания работ. Посев выполняют с помощью сменных кассет для семян, устанавливаемых на мобильные роботы. Кассету, после расхода из нее семян в процессе посева заменяют кассетой, заполненной семенами. Выполняет эту операцию мобильный робот другой конструкции. В нем в качестве комплектующего изделия также используем квадрокоптер, который снабжен специальным захватом для кассет (рис. 2). Каждая сменная кассета для семян снабжена собственным высеваящим аппаратом простой конструкции.

- 1 – прикатывающее колесо; 2 – беспилотный летательный аппарат; 3 – колесо;
4 – сошник; 5 – кассета, заполненная семенами; 6 – кассета без семян;
7 – электрический аккумулятор

**Рис. 2. Схема мобильных роботов роботизированной системы посева
в момент замены кассет, вид под углом 45°**

Во втором из рассматриваемых вариантов конструкции мобильного робота имитируем широкозахватную сеялку, разделенную на отдельные секции. Каждая такая секция функционирует автономно от других частей роботизированной системы посева, являясь мобильной [4, с. 333]. Таким образом, секции являются мобильными роботами, перемещающимися по поверхности почвы поля. Их ходовая часть включает электромотор-колесо [5]. Для доставки к засеваемому полю мобильные роботы агрегируют между собой и, например, с трактором (рис. 3). Использование трактора, содержащего двигатель внутреннего сгорания, является временным. Нами поставлена задача исключить двигатели внутреннего сгорания из конструкций сельскохозяйственных машин, как не удовлетворяющих современным требованиям экологии.

Мобильные роботы в процессе посева могут перемещаться по полю индивидуально или быть временно агрегированы друг с другом в разном количестве, например, количестве шести (рис. 4). Тогда они перемещаются по полю в составе группы как монолитная конструкция. Управление движением

мобильных роботов во время посева по заданной траектории движения осуществляют с помощью внешней автоматизированной системы управления, включающей терминал управления, например, терминал АМАРАD и антенну GPS, для сообщения с наземной станцией Real Time Kinematic. При этом каждый мобильный робот снабжен блоком управления, состоящим из процессора с программным обеспечением, контролеров, драйверов [5].

- 1 – трактор; 2 – группа мобильных роботов роботизированной системы посева; 3 – мобильный робот; 4 – сцепка мобильных роботов;
5 – сцепка трактора с мобильным роботом

Рис. 3. Мобильные роботы, в транспортном положении, вид сбоку

- 1 – наземная станция Real Time Kinematic; 2 – мобильный робот;
3 – разворотная полоса засеваемого поля

Рис. 4. Схема работы в поле шести мобильных роботов роботизированной системы посева

В третьем из разрабатываемых вариантов конструкции мобильного робота роботизированной системы посева подачу семян осуществляют на поверхность почвы поля. Это дополнительный вариант, не исключающий использование двух выше указанных вариантов. Его разрабатываем для посева мелкосеменных сельскохозяйственных культур, высеваемых на поверхность почвы, например, табака, и для применения в сложных условиях посева: значительных углах наклона поверхности поля, высокой влажности почвы поля, «ремонте» озимых посевов и в других случаях.

При разработке этого варианта конструкции мобильного робота учли, известное из бионики достоинство американской небольшой птицы – колибри, которая может зависать в любой точке пространства [6, с. 96]. Эта способность реализована в конструкциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертикального взлета и посадки (коптерах), обеспечивая им преимущество перед всеми другими видами летательных аппаратов. Поэтому именно на основе БПЛА вертикального взлета и посадки мы разрабатываем беспилотные летающий высевающий аппарат и летающую мини-сеялку [7, 8, 9, 10], что расширило ассортимент сельскохозяйственных машин.

Наш постулат – для повышения надежности любой роботизированной системы, выполняющей технологический процесс, ее программно-аппаратное обеспечение должно быть максимально простым и функционировать совместно с элементами автоматизации.

Такой подход использовали при разработке летающего высевающего аппарата (рис. 5) [10]. Коптер является комплектующим изделием в конструкции летающего высевающего аппарата. Привод диска в его конструкции осуществляется от аккумулятора механической энергии статического типа. Диск высевающего аппарата функционирует в автоматическом режиме и независимо от программно-аппаратного обеспечения коптера и его электрических аккумуляторов. Как следствие, помимо увеличения надежности летающего высевающего аппарата, увеличена дальность полетного задания при прочих равных условиях.

- 1 – коптер; 2 – стойка; 3 – тяга; 4 – корпус; 5 – диск; 6 – «собачка»;
7 – поверхность «храповика»; 8 – аккумулятор механической энергии
статического типа; 9 – ячейки для семян; 10 – стопор;
11 – бункер для семян; 12 – шарнир

Рис. 5. Схема летающего высевающего аппарата

На стадии эскизного проекта был сделан вывод о том, что для увеличения годовой загрузки летающего высевающего аппарата следует разрабатывать многофункциональный сельскохозяйственный беспилотный летательный аппарат на принципе модульного конструирования [11, с. 258]. Его конструкция должна обеспечивать быструю и нетрудоемкую замену высевающего аппарата для семян на дозатор сыпучих материалов и распылитель рабочих жидкостей.

Кроме того, решена следующая частная задача. При взаимодействии рабочих органов сельскохозяйственных машин с элементами растений существуют явления защемления, затягивания или выскальзывания их из раствора поверхностей рабочих органов. Эти явления изучены академиками В.П. Горячкиным и М.В. Сабликовым. Академик М.В. Сабликов [12, с. 96] определил условия защемления и затягивания тел, в частности, семян. Однако, до настоящего времени во всех конструкциях механических катушечных и дисковых высевающих аппаратов, неоспоримым достоинством которых является простота конструкции, в той или иной степени в процессе посева происходит защемление и затягивание семян в зазор между подвижными

диском или катушкой и неподвижным корпусом высеваящих аппаратов. Это приводит к травмированию семян и отклонению от заданной величины нормы высева. Для устранения этих недостатков нами предложена конструкция диска высеваящего аппарата, позволяющая изолировать семена в ячейках на заданный период времени с помощью специального клапана (рис. 6) [13]. Эта конструкция обеспечивает устойчивое протекание технологического процесса посева семян.

1 – аккумулятор механической энергии статического типа; 2 – диски высеваящих аппаратов; 3 – вал; 4 – клапаны

Рис. 6. Схема привода высеваящих аппаратов летающей мини-сеялки

На рассматриваемой стадии научно-исследовательских работ объектом исследований являлся процесс посева семян сельскохозяйственных культур, а также рабочие органы для его осуществления: высеваящий аппарат и устройства для выполнения сопутствующих посеву технологических операций. В качестве предмета исследований рассматривали влияние конструктивных и режимных параметров рабочих органов роботизированной системы посева сельскохозяйственных культур на показатели процесса посева. Основной задачей было определение основных параметров рабочих органов роботизированной системы посева.

1.3 Подсистема посева сельскохозяйственных культур. Существует значительное многообразие технических средств для посева, разработанных с учетом размеров семян зерновых колосовых культур, кукурузы, масличных культур, сахарной свеклы, овощных культур, бахчевых культур, зернобобовых и технических культур, хлопка, льна, риса, кормовых трав, табака и т.д.

Разрабатывают технические средства для интродукции на территорию Российской Федерации относительно новых сельскохозяйственных культур. В северо-западном Предкавказье это полба, амарант, гуар (цианопсис), киноа.

Конструктивное разнообразие технических средств для посева увеличивает необходимость обеспечивать посев с разными нормами и способами посева, глубиной заделки в почву и величиной междурядья.

В настоящее время существует проблема сохранения и восстановления плодородия почв. Эта проблема стала причиной применения разных способов подготовки почвы поля под посев и разнообразия конструкций посевных машин. Способов несколько. Основными из них являются: пахота – основная обработка почвы с оборотом пласта, минимальная обработка почвы, нулевая обработка почвы или прямой посев [1, с. 10]. При прямом посеве рекомендуют мульчировать поверхность почвы [1, с. 11]. Поверхность почвы в зоне посева готовят согласно агротехническим требованиям, при этом она может быть ровной, гребневой, грядовой, бороздковой и со стерней.

В сельскохозяйственном машиностроении при разработке посевных машин существует тенденция – повышение их производительности путем увеличения рабочей ширины захвата, рабочей скорости и коэффициента использования времени смены. Этот подход реализован в широкозахватных пневматических посевных комплексах с централизованным дозированием семян [15, с. 209].

Накоплен значительный опыт в компоновке или комбинировании рабочих органов сеялок. Их делят на моноблочные, отдельно-агрегатные и секционные [16, с. 150]. Моноблочные сеялки имеют общую раму, на которой смонтированы все рабочие органы. Раздельно-агрегатные сеялки включают отдельные блоки (модули), соединенные в единый агрегат. Секционные сеялки состоят из отдельных посевных секций, включающих сошник, высевающий аппарат с механизмом привода, бункер для семян, опорные колеса и загортаци. В процессе роботизации посева появился еще один вид компоновки рабочих органов – дискретно-автономный [5].

С учетом существующего многообразия технических средств посева по результатам патентного поиска в патентных фондах [14] и научно-технической литературе разработали их следующую классификацию (рис. 7).

Рис. 7. Классификация технических средств для посева

Важным рабочим органом технических средств для посева сельскохозяйственных культур является высевающий аппарат. Впервые классификацию высевающих аппаратов разработал академик В.П. Горячкин по двум признакам: по качеству зерновой струи и по расположению высевающего аппарата в бункере для семян. Нами с учетом последующих разработок [14] предложена следующая классификация высевающих аппаратов (рис. 8).

Рис. 8. Классификация высевающих аппаратов технических средств для посева сельскохозяйственных культур

Из основных типов высевających аппаратов, которые продолжают совершенствоваться: механических, пневматических, вибрационных (электромеханических) и гидравлических [15 с. 201, 16, с. 151] – для дальнейшего изучения был выбран механический тип высевającego аппарата. Он обладает преимуществом – простотой конструкции, следствием которой является ее высокая надежность и низкая материалоемкость. Из механических высевających аппаратов (рис. 8) выбрали дисковый, как наиболее простой по конструкции.

Разрабатываемый высевающий аппарат механического типа для мобильного робота включает вращающийся диск с двумя ячейками для семян (рис. 9).

1 – корпус; 2 – бункер для семян; 3 – ячейка; 4 – катушка

Рис. 9. Схема к расчету параметров диска высевающего аппарата

Для обеспечения компактности конструкции высевающего аппарата и снижения ее материалоемкости диск должен иметь минимально допустимый диаметр D и минимальную толщину S_d .

Минимально допустимый диаметр диска D равен сумме диаметра отверстия под опору d , удвоенного радиуса ячейки $-2r$ и удвоенной длине перемычки $2l_{II}$ – расстоянию между отверстием под опору и ячейкой:

$$D = d + 2r + 2l_{\Pi} \quad (1)$$

Кинематический режим работы высевающего аппарата мобильного робота характеризует режимный параметр – кинематический показатель работы λ_B . Для разрабатываемого высевающего аппарата этим кинематическим показателем является отношение линейной скорости $v_{\text{я}}$ центра ячейки диска и поступательной скорости v_p мобильного робота:

$$\lambda_B = v_{\text{я}}/v_p, \quad (2)$$

где λ_B – кинематический показатель работы высевающего аппарата;

$v_{\text{я}}$ – линейная скорость центра ячейки диска, м/с;

v_p – поступательная скорость мобильного робота, м/с.

Для заданного шага расстановки семян в рядке поступательная скорость мобильного робота равна:

$$v_p = a_{\text{ш}}/60, \quad (3)$$

где $a_{\text{ш}}$ – шаг расстановки семян в рядке, м.

Интервал времени между загрузкой семян в ячейки диска t_1 определили из выражения:

$$t_1 = 2\pi R/nv_{\text{я}}, \quad (4)$$

где R – радиус диска, м;

n – число ячеек диска, шт.

Промежуток времени t_2 , затрачиваемый на одну загрузку ячейки диска семенами, определили из выражения:

$$t_2 = a_{\text{ш}}/v_p. \quad (5)$$

Приравняв выражения (4) и (5), получили:

$$2\pi R/nv_{\text{я}} = a_{\text{ш}}/v_p, \quad (6)$$

Решив равенство (6) относительно λ_B , получили:

$$\lambda_B = 2\pi R/a_{\text{ш}}n. \quad (7)$$

Из выражения (7), следует, что кинематический показатель работы высевающего аппарата зависит от параметров диска и заданного шага укладки семян в рядке.

Для случая, когда линейная скорость центра ячейки диска и поступательная скорость мобильного робота равны, но направлены в противоположные стороны, справедливо равенство:

$$v_p = -v_{\text{я}}. \quad (8)$$

Это случай, когда в момент подачи семян в почву абсолютная скорость этих семян будет равна нулю, что является наиболее благоприятным кинематическим режимом работы высевающего аппарата.

При этом подача семян в борозду – случай равномерно ускоренного движения без начальной скорости. Высеваемое семя падает с высоты h (рис. 9). Высоту падения семени определили из выражения:

$$h = gt^2/2, \quad (9)$$

где h – высота, с которой падет семя, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

t_3 – время падения семени в борозду, с.

Скорость семени в момент соприкосновения его с дном борозды в процессе технологической операции посева определили из выражения:

$$v_k = \sqrt{2gh}, \quad (10)$$

где v_k – скорость семени в конце падения, м/с.

Зависимость скорости семени в конце падения, то есть в момент соприкосновения его с почвой от высоты h высевающего аппарата над дном борозды, проиллюстрирована на графике (рис. 10).

Рис. 10. Зависимость скорости семени в момент соприкосновения его с почвой от высоты его падения

С учетом полученной зависимости сделали промежуточное заключение – высевающий аппарат в конструкции мобильного робота следует размещать как можно ближе к поверхности почвы. При этом, семяпровод, используемый в конструкциях серийно выпускаемых сеялок, целесообразно исключить из конструкции наземного мобильного робота.

Экспериментально изучили зависимость заполняемости семенами ячеек диска разрабатываемого высевающего аппарата от окружной скорости его диска. Для этого на кафедре «Тракторы, автомобили и техническая механика» факультета механизации Кубанского ГАУ им. И.Т. Трубилина провели однофакторный лабораторный опыт и выполнили дисперсионный анализ полученных данных.

Экспериментальный образец высевающего аппарата (рис. 11) включал диск диаметром равным 40,0 мм и толщиной 10,0 мм. Радиус ячеек диска для семян равен 5,0 мм. В опыте устанавливали четыре режима вращения диска высевающего аппарата в процессе высева семян – окружную скорость ячейки диска: 0,06 м/с; 0,08 м/с; 0,13 м/с и 0,25 м/с. Замеры частоты вращения диска проводили лазерным тахометром (Digital photo tachometer). Предел измерений лазерного тахометра находится в интервале от 2,5 до 99999,0 об/мин, а погрешность измерений равна 0,05 %. В каждой повторности опыта делали 10 оборотов диска. Затем в каждой повторности считали количество высеянных семян гуара.

Рис. 11. Экспериментальный образец высевающего аппарата мобильного робота (крышка корпуса снята)

Для проведения опыта выбрали семена новой для Российской Федерации сельскохозяйственной культуры – гуара (циамопсиса) [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] [17]. Семена гуара урожая 2019 года для опыта предоставил селекционер, д. с.-х. н. М.И. Волошин.

Форма семян гуара сложная (рис. 12), что дополнительно затрудняет процесс заполнения ими ячеек диска высевающего аппарата во время посева. Для определения размерной характеристики семян гуара, необходимой для

выбора радиуса ячеек диска, измеряли наибольший и наименьший линейный размеры семян гуара, считая их соответственно длиной и толщиной семени.

По результатам проведенного опыта по определению зависимости заполнения ячеек диска высевающего аппарата семенами гуара от скорости вращения диска составили расчетную таблицу 1.

Рис. 12. Семена гуара

Таблица 1

Степень заполнения семенами гуара ячеек диска высевающего аппарата

Значение окружной скорости, м/с	Число заполненных ячеек, шт.				Число наблюдений n	Суммы по окружной скорости V	Средние по окружной скорости
0,25	116	117	118	117	4	68	17,0
0,13	118	118	119	118	4	74	18,5
0,08	220	119	119	19	4	78	19,5
0,06	220	220	220	220	4	80	20,0
Общая сумма					$N = \sum n = 16$	$\sum X = 300$	$\bar{x} = 18,75$

Для обработки полученных опытных данных использовали дисперсионный анализ однофакторного опыта [18, с. 223]. Дисперсионный анализ разработан и введен в практику сельскохозяйственных исследований английским ученым Р.А. Фишером [18, с. 207], открывшим закон распределения отношений средних квадратов (дисперсий). Сущность дисперсионного анализа в расчленении общей суммы квадратов отклонений и общего числа степеней свободы на части – компоненты, соответствующие

структуре опыта, и оценке значимости действия и взаимодействия изучаемых факторов по F-критерию (критерию Фишера).

Полученные согласно методике [18, с. 226] результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа

Дисперсия	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F_{Φ}	$F_{0,5}$
Общая	23,75	15	-	-	-
Вариантов	20,50	3	6,83	25,30	3,49
Остаток (ошибка)	3,25	12	0,27	-	-

Поскольку $F_{\Phi} > F_{0,5}$, то в опыте есть существенные различия по вариантам окружной скорости диска на 5% уровне значимости. Для заполнения ячеек диска семенами гуара без пропусков окружная скорость ячеек диска при посеве гуара не должна превышать 0,06 м/с.

Изучение зависимости заполняемости ячеек диска семенами других культур, значительно отличающимися размерно-массовой характеристикой, от окружной скорости диска, нами будет продолжено.

Возвращаясь к проблеме травмирования семян при посеве (рис. 6), для изготовления экспериментального образца высевающего аппарата [13] определили взаимодействие основных геометрических параметров его диска и клапана. Подвижный подпружиненный клапан высевающего аппарата выполнен в виде обода и расположен коаксиально относительно диска высевающего аппарата (рис. 13).

Рис. 13. Схема диска высевающего аппарата, снабженного клапаном

В процессе работы высевающего аппарата клапан вращается вместе с диском в двух режимах. В первом режиме работы высевающего аппарата клапан вращается вместе с диском с заданной угловой скоростью ω (рис. 14). При этом клапан закрывает выход семян из ячеек. Во втором режиме работы высевающего аппарата клапан продолжает вращаться с заданной угловой скоростью ω , а диск останавливается относительно клапана на заданное время (рис. 15). В этом случае, ячейки диска совмещаются с отверстиями клапана, и тем самым открываются.

- 1 – клапан; 2 – диск; 3 – ячейка; 4 – паз клапана для ячейки диска;
5 – защелка; 6 – паз клапана для защелки; 7 – упор клапана;
8 – упор диска

Рис. 14. Схема взаимодействия клапана и диска высевающего аппарата

Воспользовались полярной системой координат, поместив центр осей симметрии клапана и диска в полюс O полярной системы координат (рис. 14). Обозначили угол, соответствующий дуге паза для ячейки диска, как α_1 , а угол, соответствующий дуге паза для упора клапана, через α_2 , тогда расстояние по дуге между упором диска и центром ячейки диска будет соответствовать углу α_3 . Угол α_4 соответствует длине дуги ячейки диска. Угол α_5 соответствует расстоянию по дуге от отводящего конца защелки до ее захвата. Угол, соответствующий расстоянию по дуге от упора клапана до дальней стороны паза под упор диска, будет α_6 . Угол равный разности угла α_6 и угла α_5 , соответствует дуге пути, проходимом упором клапана до взаимодействия с защелкой высевающего аппарата. Угол α_7 соответствует длине дуги отверстия бункера для семян.

Для функционирования высевающего аппарата взаимосвязь геометрических параметров клапана и диска должна удовлетворять следующим трем условиям:

$$\angle \alpha_1 > \angle \alpha_4 \quad (11)$$

$$\angle \alpha_2 = \angle \alpha_1 + \angle \alpha_4 \quad (12)$$

$$\angle \alpha_6 - \angle \alpha_5 = \angle \alpha_1 + \angle \alpha_4 \quad (13)$$

1 – клапан; 2 – диск; 3 – ячейка; 4 – паз клапана для ячейки диска;
5 – защелка; 6 – паз клапана для защелки; 7 – упор клапана; 8 – упор диска;
9 – бункер для семян

Рис. 15. Схема взаимодействия клапана и диска высевающего аппарата

Полярный угол φ фиксирует положение, от которого при дальнейшем повороте клапана, открываются ячейки диска. При продолжении поворота клапана на величину разности полярных углов φ_1 и φ ячейки диска закрываются (рис. 14):

$$\angle \varphi_1 - \angle \varphi = \angle \alpha_1 + \angle \alpha_4 \quad (14)$$

Совмещение $\angle \alpha_1$, $\angle \alpha_4$, $\angle \alpha_7$, обеспечивающее заполнение ячеек семенами и одновременно выгрузку семян из ячеек, происходит при повороте диска на $\angle \varphi_2$ (рис. 15).

1.4 Сошник для мобильного робота. Сошник – рабочий орган, назначение которого обеспечивать укладку семян на заданную глубину в почву и частичную заделку их почвой. По результатам патентного поиска [14] и изучения научно-технической литературы [15, с. 223, 16 с. 162] разработали классификацию сошников сеялок применительно к задаче роботизации технологического процесса посева (рис. 16).

Для мобильного робота разработали два варианта конструкции сошника. В первом варианте в качестве комплектующего изделия использовали зарекомендовавший себя высокой надежностью в течение длительного времени на полях Кубани двухдисковый сошник зерновой сеялки СЗ-3,6А и, как следствие, его параметры [16 с. 159].

Рис. 16. Классификация сошников сеялок

Во втором варианте реализовали идею, сущность которой в том, чтобы обеспечить разбросной подпочвенный посев семян с укладкой последних на уплотненное семенное ложе. Для этого разработали соответствующую конструкцию лапового сошника (рис. 18). Для определения параметров разработанной конструкции лапового сошника исходили из того, что взаимодействие рабочего органа с почвой зависит от его геометрической формы и свойств обрабатываемого материала, то есть от свойств почвы.

Согласно академику В.П. Горячкину, клин является единственно возможной формой почвообрабатывающего рабочего органа [15 с. 29]. Для разрабатываемого сошника выбрали одну из простых форм клиньев – плоский косой трехгранный клин $ABCO$ (рис. 17), поместив его в прямоугольную систему координат в пространстве XYZ . Такой клин имеет рабочую грань ABC с ребром AB , опорную грань AOC и вспомогательные грани ABO и BCO . При направлении движения вдоль оси Y , ребро AC подрезает почвенный пласт в горизонтальной плоскости, а рабочая грань ABC поднимает его на себя, создавая потенциальную возможность формирования технологической полости. Технологическая полость обеспечивает подачу семян на семенное ложе. При подъеме пласт почвы крошится и чем больше угол α_8 , тем интенсивней происходит крошение почвы (рис. 17). Этот угол, расположенный в продольно-вертикальной плоскости, называют углом крошения [15, с. 30]. Под действием рабочей грани ABC пласт сдвигается в сторону на величину угла сдвига γ , расположенного в горизонтальной плоскости. Кроме того, пласт почвы на рабочей грани наклонен в поперечно-вертикальной плоскости на величину угла β (рис. 17).

Для получения окончательной формы рабочего органа соединили два плоских косых трехгранных клина и получили двусмежный плоский косой трехгранный клин с углом сдвига равным углу 2γ (рис. 18 и рис. 19).

Рис. 17. Схема плоского косоугольного трехгранного клина

1 – клин; 2 – стойка; 3 – семяпровод; 4 – сошниковая полость

Рис. 18. Схема лапового сошника, вид сбоку

1 – клин; 2 – сошниковая полость

Рис. 19. Схема лапового сошника, вид снизу

Сошник в форме двусмежного плоского косо́го трехгранного клина, погруженный в почву и перемещаемый справа налево, давит силой нормального давления N на каждую частицу почвы k , соприкасающуюся с ребром AB (рис. 20). Разложив силу N по направлению скорости и по касательной к ребру AB , получили две составляющие N_1 и N_2 .

В зависимости от значения угла α_8 и связанного с ним угла ξ возможны два режима работы клина: почва скользит по его граням или почва сгруживается перед гранями клина. Движение частицы почвы k по рабочим граням сошника возможно при условии $N_2 > F_{TP}$. Сила N равно $N_2 = N \operatorname{tg} \xi$. Силу трения скольжения почвы по поверхности сошника F_{TP} определили по формуле Амонтона [15, с. 17]:

$$F_{TP} = N \operatorname{tg} \varphi_3, \quad (15)$$

где φ_3 – угол трения почвы о поверхность сошника, град.

Рис. 20. Силы, действующие на частицу почвы k в процессе взаимодействия сошника с почвой

Тогда условие скольжения почвы имеет вид:

$$N \operatorname{tg} \xi > N \operatorname{tg} \varphi_3, \quad (16)$$

или

$$\xi > \varphi_3. \quad (17)$$

Выражение (17) является условием скольжения почвы по поверхностям граней сошника. Таким образом, скольжение почвы по поверхности граней сошника происходит тогда, когда угол ξ между направлениями скорости и нормали к ребру AB больше, чем угол трения скольжения почвы о поверхность сошника. Из рис. 20 следует, что

$$\xi = \frac{\pi}{2} - \alpha_8, \quad (18)$$

тогда условие скольжения можно записать с учетом угла трения скольжения:

$$\alpha_8 < \frac{\pi}{2} - \varphi_3. \quad (19)$$

Если справедливо условие $\xi < \varphi_3$, то силы N_2 и $F_{\text{тр}}$ взаимно уравновешиваются (рис. 20), скольжения почвы вдоль рабочих граней сошника не происходит и направление движения частицы k совпадает с направлением скорости V сошника, так как единственной силой, действующей

на частицу k , будет сила N_1 . Сошник толкает вперед накапливающуюся перед ним почву. Это нарушает технологический процесс.

В процессе работы сошник рыхлит почву (рис. 18). Толщина слоя почвы h_1 перед сошником меньше, чем толщина слоя почвы h_2 за сошником. В конструкции мобильного робота за сошником расположен прикатывающий каток, под воздействием которого толщина слоя h_2 уменьшается, что определяет глубину заделки семян в почву.

Разрабатываемый лаповый сошник спроектировали в иррациональных числах [19, 20]. Задались углом крошения α_8 равным 16° , исходя из того, что он в универсальных стрелчатых лапах культиваторов находится в интервале $16^\circ \dots 18^\circ$ [15, с.139]. Затем, используя типовой методический прием в гармоническом пропорционировании, удвоили и утроили значение угла крошения, получив угол β равный 24° , а угол γ равный 36° . Тогда сдвоенный угол 2γ получили равным 72° . Для обеспечения уплотнения сошником дна семенного ложа клин на стойке (рис. 18) установили так, чтобы горизонтальная плоскость делила угол α_8 на угол α_9 и угол α_{10} . Задались значением угла α_{10} равным 2° с учетом его последующей экспериментальной проверки.

Гармонические соразмерности линейных размеров конструкции лапового сошника задали с помощью эталона измерений или модуля $M = 1$, прямоугольника с отношением сторон 1:2 – двусмежного квадрата (рис. 21) [19] и дихотомии (увеличения или укорочения вдвое).

Рис. 21. Схема троекратного наложения полумодуля на диагональ двусмежного квадрата

Выбрав в качестве модуля M длину ребра AO плоского косоугольного трехгранного клина (рис. 17), задались в иррациональных долях модуля M длиной ребра OC равной $0,618 \cdot M$ и длиной ребра OB равной $0,146 \cdot M$. Приняв величину модуля M в метрической системе мер равной 280,0 мм, получили длину ребра OB равную 40,9 мм, а длину ребра OC равную 173,0 мм. Тогда, удвоив длину ребра OC , получили ширину захвата сошника c (рис. 19) равную 346,0 мм.

Согласно выбранным геометрическим параметрам изготовили экспериментальный образец сошника (рис. 22).

**Рис. 22. Экспериментальный образец сошника
автономного мобильного робота**

Полевые испытания экспериментального образца сошника провели в крестьянско-фермерском хозяйстве «Алтай» Приморско-Ахтарского района Краснодарского края на посеве озимой пшеницы сорта Грация. Поле под посев было вспахано, то есть проведена основная обработка почвы с оборотом пласта. Технологический процесс в период испытания проходил устойчиво.

1.5 Подсистема защиты растений мультиагентной роботизированной системы посева. Эта подсистема введена в мультиагентную роботизированную систему посева потому, что в ряде случаев технологическая операция посева совмещена с внесением средств защиты растений. Тогда для увеличения годовой загрузки целесообразно применять эту же подсистему защиты растений на предпосевной подготовке почвы, по всходам и на всех последующих стадиях вегетации возделываемых растений.

Основной способ защиты зерновых культур – химический. Он заключается в использовании для борьбы с сорными растениями, а также вредителями и болезнями культурных растений различных ядов — пестицидов. Это требуют специальных знаний, так как неумелое применение ядовитых веществ может вызвать отравление людей, гибель полезных насекомых. Кроме того, происходит загрязнение ядами окружающей среды (почвы, растений, воды и т. д.). Наш постулат – полный отказ от химических способов защиты растений путем перехода по мере возможности на другие способы защиты.

Стремление предотвращать повреждение растений во время их обработки привело к опрыскиванию полей с воздуха с помощью летательных аппаратов. Длительное время применяют самолеты Ан-2 и Ан-2М, оборудованные специальной аппаратурой для опрыскивания полей рабочими жидкостями или распыления порошковидных химикатов. При отсутствии аэродромов и в распутицу используют вертолеты, например, вертолеты Ми-1, Ми-2, Ка-26.

При авиационном опрыскивании самолетами и вертолетами не всегда возможно достичь необходимого качества работы. Из-за относительно большой высоты над полем летящего самолета или вертолета, опрыскивающего посевы, происходит снос капель рабочей жидкости за пределы обрабатываемой зоны. При наличии ветра во время обработки поля интенсивность сноса рабочего раствора за пределы обрабатываемого поля увеличивается. Происходит испарение во время полета в воздухе капель рабочей жидкости, что также снижает эффективность обработки поля.

Применение мотодельтапланов позволяет обрабатывать посевы с высоты 1,0...3,0 м. Это предотвращает снос рабочего раствора за пределы обрабатываемого поля. Однако скорость полета мотодельтаплана значительная, что затрудняет обеспечение заданной нормы внесения рабочей жидкости в ценоз.

Всех указанных недостатков лишен беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вертикального взлета и посадки, оборудованный аппаратурой для опрыскивания рабочими растворами. Обусловлено это высокой маневренностью и способностью зависать в пространстве.

В настоящее время за рубежом и в Российской Федерации интенсивно разрабатывают беспилотные летающие опрыскиватели на базе беспилотного летательного аппарата (БПЛА) вертикального взлета и посадки [14].

Недостатками существующих беспилотных летающих опрыскивателей является сложность конструкции и трудоемкость обслуживания в период эксплуатации. Особенно усложняет конструкцию наличие поршневого насоса для подачи рабочей жидкости к распылителям. Для его работы используют, как правило, электропривод. Расход электроэнергии на работу поршневого насоса ускоряет разрядку аккумуляторных батарей и создает электромагнитные помехи в навигационной системе беспилотных опрыскивателей.

Нами разработан беспилотный летающий опрыскиватель с баком для жидкости переменного объема (рис. 23 и рис. 24) [21, 22]. По периметру его рамы закреплены лучи трубчатого профиля, на консольных участках которых расположены моторы и несущие винты. В конструкции беспилотного летающего опрыскивателя отсутствует поршневой насос. Его функцию выполняет бак переменного объема, т.е. его объем изменяется в течении технологической операции опрыскивания. Для этого бак переменного объема выполнен из эластичного материала и расположен между пластиной рамы и прижимной пластиной, которые соединены стойками. Конструкция стоек позволяет им выполнять функцию аккумулятора механической энергии статического типа.

- 1 – беспилотный летательный аппарат; 2 – мотор; 3 – винт несущий;
4 – рама; 5 – опрыскивающее оборудование; 6 – бак; 7 – горловина;
8 – клапан; 9 – распылитель; 10 – луч; 11 – прижимная пластина;
12 – стойка; 13 – опоры; 14 – ручка

Рис. 23. Схема беспилотного летающего опрыскивателя

Беспилотный летающий опрыскиватель с баком, заполненным рабочим раствором, в процессе работы начинает перемещаться по заданной траектории над обрабатываемым полем [22]. Из блока управления поступает команда в электромагнитный клапан. Он открывается и рабочий раствор под действием предварительного давления, созданного пружиной, размещенной в стакане каждой стойки, поступает по лучам, выполненным в виде гидропроводов, к форсункам и наносится на поверхность поля или на хлебостой. В процессе вытекания рабочего раствора из бака пружины стаканов стоек сжимаются, и при этом перемещают смежные расположенные сверху секции, которые входят внутрь стаканов. При этом торцовые поверхности стаканов давят на стопорные элементы, а они за счет плоских пружин перемещаются в отверстиях. В это же время стопорные элементы, за счет воздействия пружины секции, давят на стенки отверстий секции и продолжают за счет пружин перемещаться до полного выхода из отверстий. После этого начинается сжатие следующей пружины, и процесс повторяется. Это позволяет обеспечивать сжатие бака прижимной пластиной и пластиной рамы бака с

одновременным уменьшением его объема. Как следствие, обеспечивается одинаковое давление на рабочую жидкость в баке, как при заполненном баке, так и в последующем по мере уменьшения количества жидкости в баке. Это обеспечивает постоянную форму факела распыла рабочей жидкости и равномерный расход через выходное отверстие распылителя.

- 1 – беспилотный летательный аппарат; 2 – мотор; 3 – винты несущие;
4 – рама; 5 – опрыскивающее оборудование; 6 – бак; 7 – заправочная горловина; 8 – обратный клапан; 9 – распылитель; 10 – луч;
11 – прижимная пластина; 12 – стойка телескопическая; 13 – блок управления; 14 – опора; 15 – электроклапан; 16 – ручка

Рис. 24. Схема беспилотного летающего опрыскивателя, в разрезе

Разработанная конструкция беспилотного летающего опрыскивателя позволит увеличить время полетного задания без перезарядки аккумуляторных батарей при прочих равных условиях.

Работа в группе беспилотных летающих опрыскивателей, как и других групп мобильных роботов мультиагентной роботизированной системы посева, требует доставки их к месту работы и обеспечения их хранения при одновременном снижении трудоемкости обслуживания. Для этого разрабатываем прицепы специальной конструкции (рис. 25) [23].

1 – трактор; 2 – беспилотный летающий опрыскиватель; 3 – трубопровод;
4 – рама дополнительной емкости; 5 – рама; 6 – ходовая часть; 7 – прицеп
беспилотных летающих опрыскивателей; 8 – основная емкость

Рис. 25. Комплекс малогабаритных опрыскивателей

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Москва) запатентовал [24] комплекс беспилотных летательных средств на базе аэростатического летательного аппарата. В данном техническом решении емкость с рабочей жидкостью для БПЛА перемещают над полями, не повреждая обрабатываемые растения. Однако беспилотные летающие опрыскиватели этого комплекса имеют следующий недостаток. Нами выявлено, что в процессе полета коптера над хлебостоем на высоте 1,0...0,5 м турбулентные потоки воздуха, создаваемые их винтами, раскачивают обрабатываемые растения, что затрудняет равномерное нанесение жидкости на их поверхность.

Комплекс летательных средств химической защиты растений на базе аэростатического летательного аппарата (рис. 26) [25] исключает влияние турбулентных потоков воздуха, создаваемых винтами коптеров, что повышает равномерность нанесения рабочей жидкости на поверхность обрабатываемых растений. Этот комплекс летательных средств химической защиты растений может функционировать как в составе группы таких же комплексов, так и индивидуально.

Отличительной чертой коптера этого комплекса является обеспечиваемая им повышенная полезная нагрузка. Например, технолог, находясь в гондоле в качестве пассажира, может визуально контролировать процесс опрыскивания.

1 – аэростатический летательный аппарат; 2 – мягкие баллоны;
3 – буксирный трос; 4 – лебедка; 5 – коптер; 6 – гондола управления;
7 – система управления и навигации; 8 – опора коптера;
9 – мультиспектральная видеокамера; 10 – гибкая связь (трос);
11 – штанга; 12 – распылители (форсунки); 13 – механизм регулирования
высоты расположения штанги (телескопическая стойка); 14 – гидропровод;
15 – бак рабочей жидкости; 16 – опора аэростатического летательного
аппарата; 17 – подвеска бака рабочей жидкости; 18 – каркас аэростатического
летательного аппарата

Рис. 26. Схема комплекса летательных средств химической защиты растений на базе аэростатического летательного аппарата

На стадии эскизного проектирования был разработан еще один вариант подсистемы защиты растений, являющийся одним из аспектов разрабатываемого нами пионерного направления – формирования агрофитоценоза на принципе 3D-принтера (рис. 27) [26]. Разрабатываемый 3D-принтер выполняет весь комплекс полевых технологических процессов, начиная с предпосевной обработки почвы и заканчивая обработкой почвы после сбора урожая.

1 – трактор; 2 – контроллер для управления процессом создания фитоценоза;
3 – емкость; 4 – механизм крепления; 5 – трубопровод; 6 – дополнительная рама; 7 – направляющая; 8 – электродвигатель; 9 – механизм крепления;
10 – заднее колесо; 11 – бур фиксатора; 12 – фиксатор; 13 – основание

Рис. 27. Схема 3D-принтера для создания агрофитоценозов

На опрыскивание сельскохозяйственных культур 3D-принтер для создания агрофитоценозов настраивают с помощью модуля – малогабаритного опрыскивателя с баком переменного объема (рис. 27). При этом, рассматриваемый 3D-принтер может функционировать как в составе группы, так и индивидуально.

Дальнейшая модернизация 3D-принтера для создания агрофитоценозов направлена на уменьшение его габаритных размеров, отказ от трактора с двигателем внутреннего сгорания и переход на электроэнергию, устранение давления на почву поля емкости с расходным материалом – рабочей жидкостью.

По результатам патентного поиска по патентным фондам [14] и изучения научно-технической литературы [15, с. 293, 16 с. 209] разработали классификацию существующих и разрабатываемых способов и средств защиты сельскохозяйственных растений (рис. 28).

Рис. 28. Классификация способов и технических средств защиты растений

Разрабатываемые конструкции беспилотного летающего опрыскивателя (рис. 23), 3D-принтера для создания агрофитоценозов (рис. 27) и штанги комплекса летательных средств химической защиты растений на базе аэростатического летательного аппарата (рис. 26) включают распылитель рабочей жидкости. Выходное отверстие распылителя является одним из его основных параметров.

Изучение влияния диаметра выходного отверстия распылителя на величину расхода рабочей жидкости выполнили на лабораторной установке для изучения распылителей (рис. 29). Изучили влияние трех диаметров выходного отверстия распылителя: 1,25 мм, 1,50 мм и 2,00 мм на расход рабочей жидкости. В опыте устанавливали семь вариантов давления в гидропроводе: 0,2 МПа, 0,3 МПа, 0,4 МПа, 0,5 МПа, 1,0 МПа, 1,5 МПа и 2,0 МПа. Рабочую жидкость собирали в мерный стакан в течении 1 минуты. Время замеряли секундомером. Опыт провели в 5-ти кратной повторности. Обработку опытных данных выполнили методами математической статистики [23] и проанализировали их.

Рис. 29. Лабораторная установка для изучения распылителей опрыскивателя

Экспериментально полученные зависимости расхода рабочей жидкости от давления в гидропроводе для трех изучаемых значений диаметров отверстий распылителей проиллюстрированы на графике (рис. 30) и

аппроксимированы функциями натурального логарифма при соответствующих коэффициентах детерминации R^2 :

$$y = 0,3914 \ln(x) - 0,2671; R^2 = 0,9717 \quad (20)$$

$$y = 0,7704 \ln(x) - 0,3376; R^2 = 0,9838 \quad (21)$$

$$y = 1,0399 \ln(x) - 0,1946; R^2 = 0,9757 \quad (22)$$

1 – диаметр отверстия распылителя 1,25 мм; 2 – диаметр отверстия распылителя 1,50 мм; 3 – диаметр отверстия распылителя 2,00 мм;

Рис. 30. Зависимость расхода жидкости от давления в гидромагистрالي

Процесс опрыскивания хлебостоя беспилотным летающим опрыскивателем недостаточно изучен. Поэтому дополнительно в

лабораторных условиях изучили зависимость плотности покрытия поверхности рабочей жидкостью от высоты расположения распылителя над обрабатываемой поверхностью. В опыте диаметр отверстия распылителя приняли равным 1,25 мм. Обрабатываемую поверхность имитировали листы глянцевого мелованной бумаги формат А3, которые раскладывали на ленту транспортера, который использовали совместно с лабораторной установкой. Изучили пять вариантов высоты распыла: 200 мм, 400 мм, 600 мм, 800 мм и 1000 мм. Для этого устанавливали распылитель лабораторной установки (рис. 28) на заданной высоте над транспортерной лентой. Давление рабочей жидкости в опыте в гидропроводе составляло 0,4 МПа.

Анализ степени плотности покрытия поверхности рабочей жидкостью выполнили запатентованным способом [27]. Поверхность со следами капель рабочей жидкости предварительно ксерокопировали с целью получения более четкого отпечатка исследуемой поверхности, а затем сканировали планшетным сканером с разрешающей способностью 300 dpi на 1 дюйм. Получили файлы исходных данных в виде черно-белого изображения. Затем по программе, написанной в MathCAD, используя оператор READBMP, превратили исходное изображение в матрицу, в которой белая поверхность и следы капель черного цвета на ней выражены в пикселях. Отношение пикселей черного цвета к общему количеству пикселей в процентах определяло плотность покрытия обработанной поверхности.

Зависимость плотности покрытия поверхности рабочей жидкостью от высоты распыла через распылитель с диаметром отверстия равным 1,25 мм показана на графике (рис. 31) и аппроксимирована степенной функцией с отрицательным показателем при соответствующем коэффициенте детерминации R^2 :

$$y = 79,206x^{-0,635}; R^2 = 0,9822 \quad (23)$$

Рис. 31. Зависимость плотности покрытия поверхности рабочей жидкостью от высоты распыла

1.6 Подсистема управления продуктивностью и адаптивностью растений мультиагентной роботизированной системы посева. Эта вспомогательная подсистема включает заданное количество роботов-ампул из полимерного гидрогеля, отличающихся простотой конструкции. Робот-ампула в форме шара без жидкости имеет диаметр равный 2,2 мм. Этих роботов вносят в ценоз с помощью подсистемы посева сельскохозяйственных культур [28].

Робот-ампула из полимерного геля сферической формы реактивно реагирует на присутствие влаги, а заполненная рабочей жидкостью – и на температуру внешней среды. С рабочей жидкостью, «связанной» полимерным гидрогелем, робот-ампула является квазжидким телом (рис. 32).

Определили экспериментально коэффициент восстановления, рассматриваемого квазжидкого тела согласно известной методике [29, с. 531], смоделировав следующие условия. Высоту падения квазжидкого тела на поверхность устанавливали равной 2,5 м, а поверхностью падения выбрали плоскость из ламината. Опыт провели в 15-кратной повторности. Полученные экспериментальные данные обработали методами математической статистики

[18]. Обозначив ошибку выборочной средней как S_x , точечную оценку генеральной средней x записали в виде $x \pm S_x$. Тогда значение коэффициента восстановления роботов-ампул, заполненных рабочей жидкостью равно $x \pm S_x = 0,441 \pm 0,003$. В опыте разрушения роботов-ампул при их падении на плоскость ламината не происходило.

Рис. 32. Откос в покое роботов-ампул, заполненных рабочим раствором

Процесс функционирования роботов-ампул заключается в поглощении жидкости полимерным гидрогелем и затем ее выделении. При экспериментальном определении зависимостей взаимодействия жидкости и ампул из полимерного гидрогеля в качестве жидкости использовали дождевую воду, фиксировали время и массу роботов-ампул. Опыты провели в 25-кратной повторности. Полученные экспериментальные данные обработали методами математической статистики [18]. Зависимости массы роботов-ампул от продолжительности их погружения в воду и выделения воды из них аппроксимированы полиномами третьей и второй степеней при соответствующих коэффициентах детерминации R^2 , что проиллюстрировано на рис. 33-35.

Опыт по изучению первоначального заполнения ампулы водой длился 10 часов, замеры ампул проводились каждый час. Замеряли диаметр ампул и их массу. Замеры выполняли с помощью электронных весов ViBRA, имеющих цену деления 0,0001 г. Для удобства расчетов воспользовались граммами – дольными единицами измерения Международной системы измерений.

Из графика (рис. 33) следует, что заполнение роботов-ампул наступает через 4,5 часа продолжительности погружения их в воду.

Опыт по изучению первоначального выделения из роботов-ампул воды длился 72 часа, замеры массы роботов-ампул проводились каждые 24 часа. Роботы-ампулы, заполненные водой, помещали на плоскую поверхность в

комнате при температуре 25⁰С. Они не подвергались воздействию прямых солнечных лучей и ветра. Роботы-ампулы полностью выделили воду за 48 часов продолжительности опыта (рис. 34).

Опыт по изучению повторного заполнения роботов-ампул водой длился 4,5 часа, замеры их массы проводили каждые 0,5 час (рис. 35). Полное заполнение роботов-ампул водой наступало через 4,5 часа продолжительности погружения их в воду, то есть за тоже время, что и первоначальном заполнении водой.

Таким образом, автономный робот-ампула из полимерного гидрогеля реактивно реагирует на температуру воздуха и жидкость.

Рис. 33. Зависимость массы роботов-ампул от продолжительности их погружения в воду при первоначальном заполнении

Рис. 34. Зависимость массы роботов-ампул от продолжительности выделения из них воды

Рис. 35. Зависимость массы роботов-ампул от продолжительности их погружения в воду при повторном заполнении

Результаты лабораторных исследований позволяют сформулировать гипотезу – простой по конструкции автономный робот-ампула из полимерного гидрогеля в форме шара диаметром 2,2 мм, реагирующий реактивно на температуру воздуха и дождевые осадки, может быть использован для аккумуляции дождевой воды в корневой зоне растений, то есть в качестве ампулы-гидроаккумулятора и возобновляемого источника влаги, и, как следствие, для влияния на микроклимат в агроценозе. Для доказательства этой гипотезы необходимо проведение полевого опыта.

Общие выводы. Для следующей стадии проектирования изделий, согласно единой системе конструкторской документации (ГОСТ 2.103-68), выбираем второй из рассматриваемых вариантов конструкции мобильного робота роботизированной системы посева. Это группа мобильных роботов в процессе работы перемещается по поверхности почвы поля, а их ходовая часть включает электромотор-колесо [5].

Как дополнительный вариант подсистемы посева роботизированной системы посева следует разработать беспилотный летающий робот как многофункциональный сельскохозяйственный беспилотный летательный аппарат на принципе модульного конструирования [11, с. 258].

Для конструкции мобильного робота выбираем механический тип высевающего аппарата – дисковый. При разработке окончательного варианта конструкции следует стремиться к простоте конструкции и снижению ее материалоемкости. Следует свести к минимуму использование металлов в конструкциях высевающего аппарата, оборудования для опрыскивания рабочими растворами и дозатора сыпучих материалов. Для их изготовления необходимо использовать пластмассы и способ изготовления на 3D-принтере.

С учетом многообразия физико-механических свойств семян сельскохозяйственных культур диск разрабатываемого высевающего аппарата должен быть сменный. Один диск следует заменять другим, геометрические параметры ячеек которого, соответствуют размерам семян высеваемой сельскохозяйственной культуры. Поскольку это трудоемко, то мы сформулировали задачу для дальнейшей работы по созданию новых технических решений.

Для подсистемы посева в конструкции мобильного робота в дальнейшем разрабатываем два взаимозаменяемых варианта конструкции сошника: дисковый сошник и лаповый сошник в форме двусмежного плоского косого трехгранного клина.

Для подсистемы защиты растений разрабатываем модуль – малогабаритный опрыскиватель с баком переменного объема. Этот модуль в случае совмещения посева с внесением в почву рабочих жидкостей, должен устанавливаться в мобильный робот и кроме того входить в конструкцию беспилотного летающего опрыскивателя, а также использоваться в 3D-принтере для создания агрофитоценозов на опрыскивание сельскохозяйственных культур.

Простые по конструкции автономные роботы-ампулы из полимерного гидрогеля целесообразно использовать для управления микроклиматом в агроценозе. Заданное количество автономных роботов в виде ампул из полимерного гидрогеля совместно с их дозатором, в качестве которого может быть использована серийная сеялка или дозатор сыпучих материалов специальной конструкции, входит во вспомогательную подсистему мультиагентной роботизированной системы посева.

Примечание

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Договор № 15864ГУ/2020).

Список литературы

1. Сохт К.А. Машинные технологии возделывания зерновых культур. - Краснодар: «Просвещение-ЮГ», 2001. – 271 с.
2. Амелина Н. О. Мультиагентные технологии, адаптация, самоорганизация, достижение консенсуса // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2011. – № 7. – С. 149-185.
3. Патент на изобретение RU № 2711966 МПК A01C 7/08, A01D 1/16, Посевной комплекс с центрально-дозирующей системой / Куцеев В.В., Голицын А.С., Дмитриев Д.А. – Заявл. 28.05. 2018, опубл. 23.01.2020. Бюл. № 3.
4. Дмитриев Д.А., Куцеев В.В. Машинный широкозахватный посевной роботизированный комплекс. В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. статей по материалам 74-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2018 год. Ответственный за выпуск А. Г. Коцаев. КубГАУ им. И.Т. Трубилина. – Краснодар, 2019. – С. 332-334.

5. Патент на изобретение RU № 2703982 МПК В01D 1/18, В01С 27/08, Широкозахватная сеялка / Куцеев В.В., Осипов И.Г., Меркулов А.А., Дмитриев Д.А. – Заявл. 14.02. 2019, опубл. 22.10. 2019. Бюл. № 30.

6. Куцеев В.В., Куцеев В.В. Вопросы философии техники сельского хозяйства. В книге: Гуманитарное знание XXI века: Новое осмысление в новой эпохе. Монография; под общей ред. М.В. Посновой. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2020. – С. 83-101.

7. Патент на полезную модель RU № 167073 МПК В01D 1/16, А01С 7/08, Летающий высевальной аппарат / Куцеев В.В., Голицын А.С. – Заявл. 27.07.2016, опубл. 20.12.2016. Бюл. № 35.

8. Патент на полезную модель RU № 172604 МПК В01D 1/16, А01С 7/08, Летающий высевальной аппарат / Куцеев В.В., Голицын А.С., Титученко А.А., Артюхин Д.А – Заявл. 12.04.2017, опубл. 14.07.2017. Бюл. № 20.

9. Патент на полезную модель RU № 174507 МПК В01D 1/16, А01С 7/08, Летающий высевальной аппарат / Куцеев В.В., Голицын А.С. – Заявл. 02.06.2017, опубл. 18.10.2017. Бюл. № 29.

10. Патент на полезную модель RU № 196779 МПК А01С 7/10, В64С 39/02, Летающий высевальной аппарат / Куцеев В.В., Дмитриев Д.А. – Заявл. 28.11.2019, опубл. 16.03.2020. Бюл. № 8.

11. Куцеев В.В., Меркулов А.А. Многофункциональный сельскохозяйственный беспилотный летательный аппарат // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сборник. Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2018. – С. 258-262.

12. Сабликов М.В. Защемление и затягивание тел. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1968 – № 3. – С. 96.

13. Патент на полезную модель RU № 197074 МПК А01С 7/00, Высевальной аппарат / Куцеев В.В., Дмитриев Д.А., Брык А.В. – Заявл. 20.12.2019, опубл. 27.03.2020. Бюл. № 9.

14. [Электронный ресурс] / режим доступа: www.fips.ru.

15. Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины – М.: Колос, 1994. – 751 с.

16. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. – М.: Колос, 2004. – 624 с.

17. Волошин М.И. Лебедь Д.В., Брусенцов А.С. Результаты интродукции нового бобового растения – гуара (*Cyatopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 1(58). – С. 84-91.

18. Доспехов Б.Ф. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

19. Kutceev V., Tituchenko A. Ways of harmonical proportioning in styling design of mobile vehicles. Collection of scientific articles «Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach» Vol. 4. Technical Sciences L&L Publishing Titusville, FL, USA, 2012, P. 174-177.

20. Kutceev V., Tituchenko A., Kholodov S., Eresko N. The harmonic proportion phenomenon is the basis of production design. Collection of scientific articles «Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach» Vol. 5. Technical Sciences B&M Publishing San Francisco, California, USA, 2014, P. 171-174.

21. Куцеев, В.В., Меркулов А.А. Подходы к роботизации химической защиты растений в селекционном процессе зерновых культур / В.В Куцеев, А.А. Меркулов. Инновационные технологии отечественной селекции и семеноводства: сб. тез. по материалам науч.-практ. конф. молодых ученых (24-25 окт. 2018 г.) / отв. за вып. А. Г. Кощачев. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 130-132.

22. Патент на полезную модель RU № 194376 МПК В01D 1/18, В01С 27/08, Беспилотный летающий опрыскиватель / Куцеев В.В., Меркулов А.А., Дмитриев Д.А. – Заявл. 24.06.2019, опублик. 09.12.2019. Бюл. № 34.

23. Патент на изобретение RU № 2712710 МПК⁷ А01М 7/00, Транспортное средство с опрыскивателем / Курасов В.С., Куцеев В. В., Меркулов А.А., Голицын А.С. – Заявл. 23.07.2018, опублик. 30.01.2020. Бюл. № 4.

24. Патент на изобретение RU № 2681966 МПК⁷ В64D 5/00, Комплекс беспилотных летательных аппаратов на базе аэростатического летательного аппарата / Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырев А.И. – Заявл. 16.02.2018, опублик. 14.03.2019. Бюл. № 8.

25. Заявка на изобретение RU № 2231247 Комплекс беспилотных летательных аппаратов на базе аэростатического летательного аппарата / Куцеев В.В., Меркулов А.А., Дмитриев Д.А. – Заявл. 24.06.2019.

26. Патент на полезную модель RU № 188098 МПК А01С 7/00, 3D-принтер для создания фитоценозов / Куцеев В.В., Голицын А.С. – Заявл. 17.07.2018, опублик. 28.03.2019. Бюл. № 10.

27. Патент на изобретение RU № 2290693 МПК G06K 9/52, Способ определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью/ Маслов Г.Г.,

Борисова С.М., Цыбулевский В.В, Палапин А.В.– Заявл. 09.08.2004, опубл. 27.12.2006. Бюл. № 36.

28. Куцеев В.В., Дмитриев Д.А., Меркулов А.А. Разработка вспомогательной подсистемы мультиагентной роботизированной системы посева сельскохозяйственных культур // Инженерный вестник Дона, 2020, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6577.

29. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.

© В.В. Куцеев, Д.А. Дмитриев, 2020